

Karel SOSNA¹, Milan BROŽ², Jaroslav ŠTRUNC³ a realizační tým projektu 1H-PK/31⁴

**LABORATORNÍ STANOVENÍ HYDRODYNAMICKÝCH A MIGRAČNÍCH PARAMETRŮ
GRANITOVÝCH BLOKŮ A JEJICH VZTAH K ŠÍŘENÍ SEISMICKÝCH VLN – INFORMACE O
ŘEŠENÍ PROJEKTU**

**LABORATORY DETERMINATION OF HYDRODYNAMIC AND MIGRATION PARAMETERS
OF GRANITE BLOCKS AND THEIR RELATION TO SEISMIC WAVES SPREADING –
INFORMATION ABOUT PROJECT**

Abstract

Hydrodynamic and migration parameters of granite blocks are very important features on research of efficiency of injection grouts used in a fracture systems of granite. In this paper we discuss an influence of hydraulic gradient on the volumetric flow through the media and diffusion of chemical tracers at natural and artificial fractures. We also provided some tests of ultrasound velocity at fractured and solid rock. Our results correspond to our theoretical presumptions – the higher pressure of water causes lower diffusion than lower pressure and fractured granite has lower velocity of ultrasound waves than solid one.

Key words: laboratory measurement, hydrodynamic and migration parameters, ultrasound velocity

Úvod

Laboratorní testy stanovující hydrodynamické a migrační parametry granitových bloků jsou součástí výzkumného projektu Metody a nástroje hodnocení vlivu inženýrských bariér na vzdálené interakce v prostředí hlubinného úložiště, jehož cílem je vytvoření metodiky určující účinnost injekčních směsí použitých v puklinovém systému granitových hornin. Výsledky testů slouží jako vstupní a ověřovací data pro matematické modely.

Prezentované experimenty byly provedeny na třech typech granitových těles. První byly testovány válce, jejichž výška činila 150 a 200 mm a průměr 83, 105 a 137 mm. Dále to byly bloky o rozměrech 800×600×300 mm s uměle vytvořenou puklinou. Posledním typem byl granitový blok tvaru krychle o délce hrany 600 mm s přirozenou puklinou.

Hydrodynamické testy byly prováděny na všech třech typech těles. Testy probíhaly za podmínek stacionárního proudění při konstantním hydraulickém gradientu v nasyceném prostředí. Každý vzorek byl testován minimálně pro tři rozdílné hydraulické gradienty. Výstupem byly objemové průtoky vzorky.

Migrační testy probíhaly na blocích s puklinami, rovněž při stacionárním proudění. Jako konzervativní stopovací látka byl zvolen jak roztok chloridu sodného tak roztok fluoresceinu. Detekce stopovací látky probíhala měřením elektrické konduktivity a intenzity záření stopovače v modrém světle. Výstupem byly průnikové křivky průniku stopovače.

¹ Mgr. Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR, v.v.i., V Holešovičkách 41, Praha 8, strunc@irms.cas.cz

² Ing., CSc., Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR, v.v.i., V Holešovičkách 41, Praha 8, mbroz@irms.cas.cz

³ Ing., Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR, v.v.i., V Holešovičkách 41, Praha 8

⁴ Mgr. Michal Vaněček, Mgr. Jana Michálková, RNDr. Radek Hanus, Ing. Petra Rousová, Mgr. Vlasta Navrátilová, ISATech s.r.o., Osadní 26, Praha 7

RNDr. Tomáš Navrátil, Ph.D., GU AV ČR, v.v.i., Rozvojová 135, Praha 6

RNDr. Martin Milický, Mgr. Michal Polák, ProGeo s.r.o. Tiché Údolí 113, Roztoky u Prahy

Ing. Jiří Zárubá, Mgr. Hana Křížová, SG-Geotechnika a.s., Geologická 4, Praha 5

Kromě výše zmiňovaných testů byly měřeny okrajové podmínky a to – geometrie a rozevření puklin a pevnost v prostém tlaku, objemová hmotnost a pórovitost granitu.

Současný stav

Metody popisující proudění vody puklinovým systémem hornin dosáhly v posledních letech velkého rozvoje. To je způsobeno hlavně potřebami naftového a jaderného průmyslu. Závislostí průtoku vody puklinou na tlaku se v současnosti zabývá Zhang et al. (2006). Na základě laboratorních experimentů navrhl vztah mezi propustností a rozevřením pukliny. Migraci nesorpčních radioaktivních stopovacích látek přírodní granitovou puklinou studoval Park et al. (1996). Laboratorními migračními experimenty uměle vyrobené pukliny se zabýval Park et al. (2002). Tuto studii zaměřil na interpretace retardace a difúze stopovače v puklině do matrice granitu. Barton a Quadros (1997) studovali vliv rozevření a hrubosti puklin na jejich injektovatelnost. Při testech též diskutovali průběh puklinové propustnosti při současném smykání horniny.

Geologie

Granitové vzorky použité ke všem laboratorním testům pochází z kamenolomu nacházejícím se mezi obcemi Studená a Počátky, v katastru obce Panské Dubenky v okrese Jihlava na Českomoravské vrchovině.

Nejvýznamnější strukturně tektonickou jednotkou celého širšího regionu je centrální moldanubický masív, který vystupuje v ose antiklinoria Českomoravské vrchoviny a táhne se ve směru SSV–JJZ od Sázavy až do rakouského Waldviertelu. Celý masív diskordantně proráží antiklinálním pásmem, původně tvořeným cordieriticko-biotitickými pararulami a migmatity, které se místy vyskytují v podobě reliktů pláště i na hlavním tělese plutonu (Vaněček 2005).

Petrograficky se jedná o středně zrnitý dvojslidný granit. Hornina je masivní a kompaktní. Tvoří homogenní stavby s ojedinělými hypidiomorfně omezenými vyrostlicemi draselného živece. Minerální složení tvoří křemen, draselný živec, plagioklas, biotit a muskovit. Mezi akcesorie patří apatit, zirkon, sericit a andaluzit (Domečka, Sasínová 2005).

Laboratorní vzorky

Celkem bylo v laboratorii testováno 25 granitových těles. 22 těles, které byly zkoušeny v úvodu, mělo tvar válce. Výška těles byla 150 nebo 200 mm a průměr 83, 105 a 137 mm. 11 celistvých těles obsahovalo vyhojenou subhorizontální puklinu, 1 těleso mělo puklinu otevřenou vzniklou bodovým slepením rozpadlého vzorku a 10 těles nebylo viditelně tektonicky porušeno. V ose válců byly vedeny vrty s průměrem 18 mm, které sloužily k vtlačení nebo čerpání zkoušeného média. Další 2 tělesa, nazvaná hřebeny, představují vždy dvojici do sebe sesazených kvádrů o rozměrech 800×600×300 mm. Umělé pukliny tvaru cimbuří vznikly vytvořením pravidelných zářezů na plochách obou dvojic kvádrů. Zářezy byly orientovány kolmo k nejdélší straně kvádrů. Jedna uměle vytvořená puklina byla testována bez výplně, druhá byla vyplněna granitovou drť frakce 0,5–1,0 mm simulující výplň tektonické brekcie. Horní kvádry byly opatřeny vrty. Vtláčecí vrty s průměrem 18 mm byly umístěny v podélné ose ve vzdálenosti 10 mm od kratší hrany kvádrů. Jímací vrty s průměrem 65 mm byly umístěny v podélné ose ve vzdálenosti 10 mm od protější kratší hrany kvádrů. Okraje uměle vytvořené pukliny byly zatěsněny pomocí silikonové pasty. Posledním testovaným tělesem byl granitový blok tvaru krychle o délce hrany 600 mm. Tento blok byl postižen průběžnou subhorizontální puklinou se sklonem 7,5°. Uprostřed horní podstavy byl proveden vrt s průměrem 18 mm, který v průběhu hydrodynamických a migračních testů sloužil k vtlačení vody a stopovače. Vyhojená puklina byla pro účely testů rozpojena. Okraje pukliny byly zatěsněny až na 48 mm dlouhý úsek v nejnižším místě pukliny na vzorku, kterým vytékala voda z bloku do nádoby a kde probíhalo měření jejího množství.

Hydrodynamické testy

Hydrodynamické testy byly realizovány na všech třech typech laboratorních vzorků. Experimenty probíhaly za podmínek stacionárního proudění při konstantním hydraulickém gradientu

v nasyceném prostředí. Na válcích s viditelnou puklinou byl udržován konstantní rozdíl tlakových výšek hladin pomocí byřety spojené se vzorkem pakrem. Válce bez viditelných puklin byly zkoušeny v trojose komoře. Konstantní hydraulický gradient byl vyvozen natlakováním komory. V průběhu testů hřebenů a kvádrů bylo dosaženo konstantní hydraulické výšky Boyle-Mariottovou lahví. Každý vzorek byl testován minimálně pro tři rozdílné hydraulické gradienty. V průběhu hydrodynamických testů byl zaznamenáván objem proteklé vody (V), čas (t) a teplota (T). Při testech s byřetou, kde byl objem vody měřen na vstupu, se kontrolní byřetou sledoval výpar a o tuto hodnotu byla měřená data opravena.

Hodnoty objemového průtoku puklinou (q) byly z měřených hodnot vypočteny podle vztahu:

$$q = \frac{V}{t}$$

Hydrodynamické testy na válcích byly vyhodnoceny podle Darcyho zákona, který udává hodnotu koeficientu hydraulické vodivosti (k) podle vztahu:

$$k = \frac{V}{A \cdot t \cdot i},$$

kde (A) odpovídá filtrační ploše vzorku a (i) rozložení tlakového potenciálu. Tento vztah byl použit i pro vzorky obsahující vyhojenou puklinu. Toto rozhodnutí vyplynulo po uskutečnění série experimentálních testů, při kterých bylo do měřeného média přidáno kontrastní barvivo. Po ukončení série testů a rozdrčení těles v lisu bylo zjištěno, že všechny úlomky obsahují hlavně v krystalech živeců stopy kontrastního barviva (Obr. 1). Tím byla potvrzena domněnka, že médium proudí celým tělesem tedy nejen zónou okolo pukliny ale i dalšími póry.



Obr.1 Stopy kontrastního barviva na vzorku.

Do všech výsledků byla zahrnuta korekce na konstantní teplotu vody 10°C, která umožňuje jejich vzájemné porovnání. Výsledky testů byly vyneseny do grafu znázorňujícím závislost objemového průtoku na hydraulickém gradientu.

Migrační testy

Migrační testy se uskutečnily na hřebenech s umělou puklinou a kvádru s přirozenou puklinou. Testy probíhaly při stacionárním proudění v nasyceném prostředí při třech rozdílných hydraulických gradientech, které odpovídaly gradientům hydrodynamických zkoušek. Jako konzervativní stopovač byl zvolen roztok chloridu sodného (NaCl) s koncentrací 1 g/l a roztok fluoresceinu uraninu (3-hydroxy-6-oxo-9-(2'-karboxyfenyl)-xanten sodný) s koncentrací 0,003 g/l. Do horninových bloků bylo vtláčecím vrtem injektováno 0,5 l roztoku stopovače, poté byl vzorek proplachován vodou. Detekce NaCl v jímacím vrtu respektive nádobě byla prováděna měřením elektrické konduktivity konduktometrem. Fluorescein byl detekován speciální televizní kamerou, která umožňuje použitím modrého světla definované vlnové délky 490 nm a oranžového filtru při tmavém pozadí sledovat pouze jeho fluorescenci. Výstupem migračních testů byly takzvané průnikové křivky, které zachycují vývoj konduktivity respektive intenzity záření stopovače v čase.

Seismická měření

Válcovité vzorky byly před samotným stanovením propustnosti podrobeny nedestruktivní zkoušce měřící rychlost šíření podélných a příčných vln. Válcovité vzorky byly ultrazvukem prozařovány na výšku a přes průměr tělesa a to i v blízkosti pukliny.

Elektrický zdroj pro buzení ultrazvukového signálu ultrazvukového signálu vytvářel obdélníkové napětíové pulsy s náběžnou hranou 26 ns/100 V a posílal je na vysílací piezosnímač. Z přijímacího piezosnímače byl signál veden přes vysokofrekvenční předzesilovač do osciloskopu. Při proměřování vzorků bylo použito zesílení 40 dB. Vyhodnocování zpoždění signálu probíhalo na osciloskopu se 100 MHz vzorkováním. Signál byl z důvodu odstranění nežádoucích rušivých fluktuací průměrován z osmi měření (Lokajiček, 2005).

Okrajové podmínky

Hodnoty objemové hmotnosti vyjádřené jako poměr hmotnosti suchého zkušebního tělesa a jeho objemu měřené na válcovitých tělesech se pohybují v rozmezí 2599 až 2635 kg.m⁻³.

Pórovitost otevřená pro proudění vody definovaná poměrem mezi objemem otevřených pórů a objemem zkušebního tělesa dosahuje hodnot 0,72 až 1,15 %.

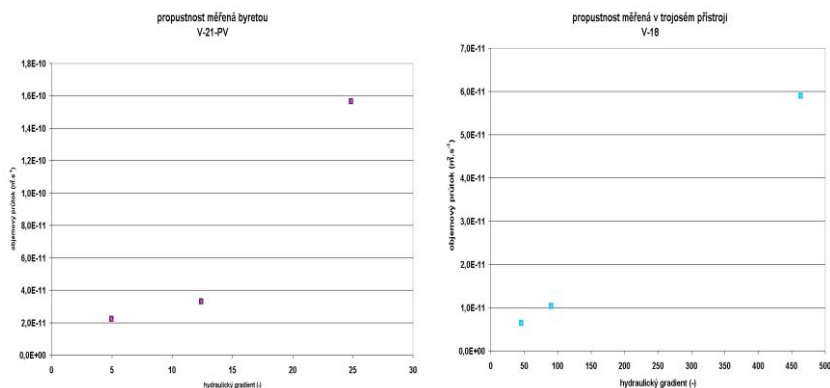
Pevnost v prostém tlaku byla měřena na třech vzorcích tvaru hranolu o rozměrech 60×60×120 mm. Vzorek bez pukliny dosáhl pevnosti 113 MPa, vzorek s puklinou kolmou na směr zatěžování 91 MPa a vzorek s puklinou šikmou na směr zatěžování pouze 84 MPa. Z výsledků je patrný vliv přítomnosti a orientace pukliny na pevnost horniny.

Výsledky testů

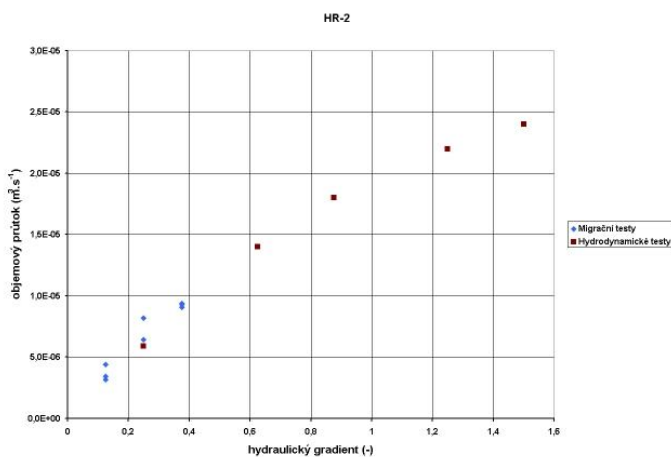
Vyhodnocením hydrodynamických testů válcovitých těles jsme zjistili, že se hodnoty koeficientu hydraulické vodivosti pohybují v řádech 10⁻¹⁰ až 10⁻¹² m.s⁻¹. Hodnoty se příliš neliší mezi vzorky bez viditelné pukliny a vzorky s vyhojenou puklinou. Testy s kontrastním barvivem prokázaly, že médium proudí celým tělesem vzorku. Puklinová propustnost válců byla stanovena na tělese s otevřenou puklinou. Objemový průtok puklinou byl o čtyři řády vyšší než ostatními tělesy.

Na výše uvedených grafech (Obr. 2) vybraných válcovitých vzorků lze sledovat lineární závislost objemového průtoku na hydraulickém gradientu, která odpovídá Darcyho teorii.

Objemové průtoky umělými puklinami v hřebenech dosahují při hydraulickém gradientu 0,125 až 0,375 hodnot 10⁻⁶ m³.s⁻¹. Mezi puklinou bez výplně a puklinou s granitovou drtí nebyl sledován rozdíl v rychlosti proudění. V průběhu hydrodynamických testů hřebene s výplní byl pozorován nelineární nárůst objemového průtoku při vyšších hydraulických gradientech (Obr. 3). To lze vysvětlit změnou laminárního proudění na turbulentní, při kterém Darcyho zákon neplatí ve své lineární formě.



Obr.2 Propustnost válců s vyhojenou puklinou a bez viditelného tektonického porušení.

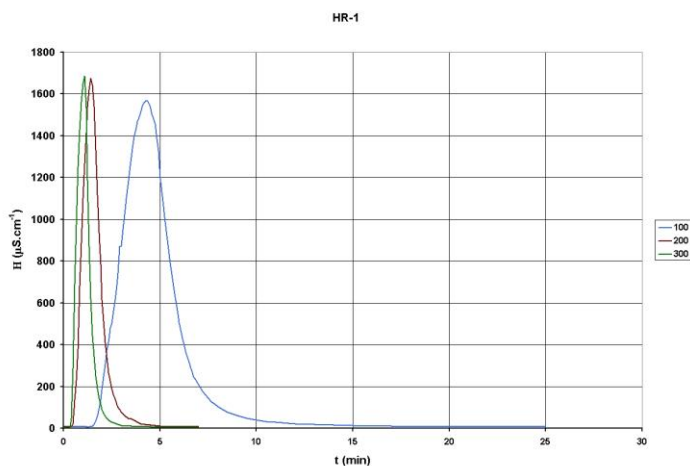


Obr.3 Propustnost umělé pukliny s drtí (hnědě hydrodynamické a modře migrační testy).

Během hydrodynamických testů přirozené pukliny na granitovém kvádru se při hydraulickém gradientu 1,095 až 1,441 hodnota objemového průtoku pohybovala v řádu 10^{-6} m³.s⁻¹.

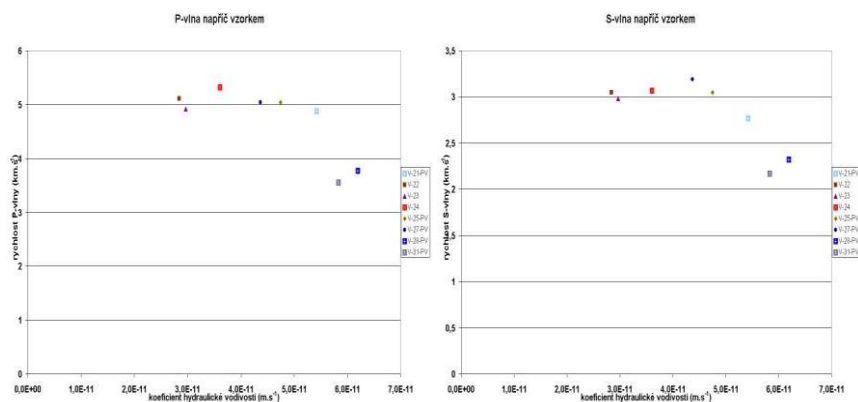
Migračními testy byly kromě průnikových křivek určeny časy příchodu a maximální koncentrace stopovací látky do jímacího vrtu respektive nádoby. Průnikové křivky obou stopovačů mají podobný tvar. Rovněž hodnoty časy příchodu a maximální koncentrace obou stopovačů si odpovídají.

Na Obr. 4 jsou zaznamenány průnikové křivky NaCl realizované na hřebeni s umělou puklinou bez výplně. Relativně strmý nárůst a pokles koncentrace indikují malou difúzi stopovače v puklině. Po dočerpání dochází k vymývání stopovače z pukliny. V grafu je patrný trend zvyšování hodnoty dosaženého vrcholu vodivosti a zúžení tohoto vrcholu v závislosti na zvyšujícím se hydraulickém gradientu. To vypovídá o zrychlení proudění puklinou a zmenšení difúze.



Obr.4 Průnikové křivky umělou puklinou bez výplně při výšce hladin 100, 200 a 300 mm.

Na válcovitých vzorcích byly měřeny rychlosti průchodu ultrazvukových vln. Hodnoty rychlostí P-vln kolísají v rozmezí $3,55$ až $5,33 \text{ km.s}^{-1}$, hodnoty rychlostí S-vln v rozmezí $2,06$ až $3,00 \text{ km.s}^{-1}$. Tyto hodnoty byly korelovány s výsledky hydrodynamických testů. Na Obr. 5 je vynesena závislost rychlosti šíření P a S vln napříč vzorkem na koeficientu hydraulické vodivosti. Z grafu je patrné, že válcovité vzorky, které jsou porušenější a tím propustnější, mají snížené rychlosti vlnění.



Obr.5 Korelace rychlosti šíření ultrazvukových vln a koeficientu hydraulické vodivosti.

Závěr

V rámci laboratorních experimentů jsme stanovili hydrodynamické parametry válcovitých těles s vyhojenými puklinami a těles bez puklin. Dále byly zjištěny hydrodynamické a migrační parametry horninových bloků s uměle vytvořenou a přirozenou puklinou. Prozařováním ultrazvukem byly zjištěny rychlosti šíření podélných a příčných vln a byla pozorována závislost mezi těmito rychlostmi a propustností válcovitých těles. Dalšími měřeními byly určeny okrajové podmínky granitových válců.

V další etapě pokračují laboratorní práce stanovením hydrodynamických a migračních parametrů bloků, které mají pukliny injektovány injekční směsí. Testy před a po injektáži budou následně probíhat v terénu ve větším měřítku. Souběžně s testy jsou realizovány jejich matematické simulace.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl s podporou Ministerstva průmyslu a obchodu České republiky v rámci projektu registrovaného pod číslem 1H-PK/31 MPO ČR.

Literatura

- [1] Barton, N., de Quadros, E.F. (1997): Joint aperture and roughness in the prediction of flow and groutability of rock masses. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. 34:3-4, Paper No. 252.
- [2] Domečka, K. & Sasínová, R. (2005): Panské Dubenky, Petrografický popis. 1H-PK/31 MPO ČR.
- [3] Lokajiček, T. (2005): Ultrazvukové prozařování podélných a příčných vln na vzorcích granitu. Výzkumná zpráva. 1H-PK/31 MPO ČR.
- [4] Park, Ch.K., Vandergraaf, T.T., Drew, D.J. & Hahn, P.S. (1996): Analysis of the migration of nonsorbing tracers in a natural fracture in granite using a variable aperture channel model. Journal of Contaminant Hydrology, 26, 97-108.
- [5] Park, Ch.K., Ryu, B.H. & Hahn, P.S. (2002): Migration characteristics of some chemical species in a granite fracture according to their chemical properties. Korean J. Chem. Eng., 19(5), 765-772.
- [6] Vaněček, M. et. al. (2005): Charakteristika geologických poměrů. Dílčí výzkumná zpráva 1H-PK/31 MPO ČR.
- [7] Zhang, J., Standifird, W.B., Roegiers, J.C. & Zhang, Y. (2007): Stress-dependent fluid flow and permeability in fractured media: from lab experiments to engineering applications. Rock Mech. Rock Engng., 40(1), 3-21.